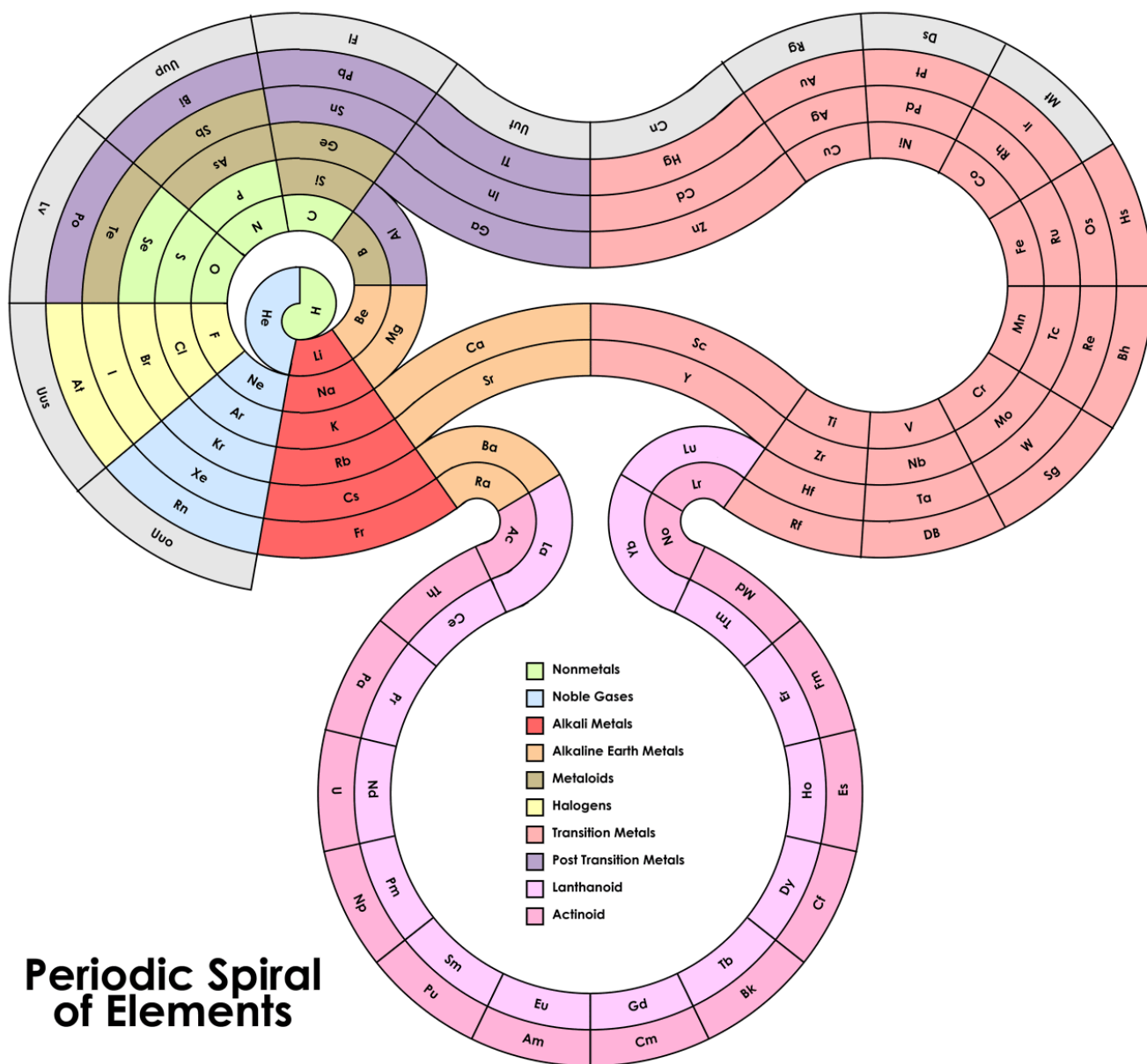




LES MONOGRAPHIES

Quelques règles et des exemples

Martin VÉROT

Dans le programme de l'agrégation, les monographies reviennent dans plusieurs montages de chimie générale. (Fe, Cu, Co, Al, Mg) Il est donc crucial d'avoir certaines règles systématiques pour aborder ce genre de montage particulier. Ce polycopié vise à donner quelques règles générales – dans un ordre aléatoire. Bien évidemment, tout lot de règle est fait pour être enfreint, mais si vous le faites, faites-le pour de bonnes raisons.

Cet ouvrage s'adresse initialement aux étudiants préparant l'agrégation de sciences physiques option chimie à l'ENS de Lyon. Cependant, il convient également aux personnes préparant les concours pour l'enseignement supérieur et plus généralement à tous les étudiants en sciences physiques, aussi bien à l'université qu'en classe préparatoire.

Ces notes sont mises à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale, version 3.0 non transposé. Si vous voyez des erreurs ou si vous avez des réflexions sur ces notes, vous pouvez m'envoyer un e-mail à martin.verot#ens-lyon.fr avec un @ à la place du #. J'y répondrai avec plaisir.

Table des matières

1	Les 10 lois de la monographie	5
1.1	Lors du montage, sur les expériences tu te focaliseras.	5
1.2	Au cours de l'année, tes monographies tu travailleras.	5
1.3	Les degrés d'oxydation de l'élément tu apprendras.	5
1.4	Le diagramme potentiel-pH de l'élément tu montreras – et utiliseras.	5
1.5	Les potentiels rédox des couples utilisés tu connaîtras.	6
1.6	Les sources principales de l'élément tu apprendras.	6
1.7	Les alliages de l'élément tu maîtriseras.	6
1.8	Les données industrielles tu chercheras.	6
1.9	Les différents degrés d'oxydation tu montreras.	6
1.10	La bibliographie tu consulteras.	6
2	Un exemple : le cobalt	7
2.1	Manipulations, plan	7
2.2	Propriétés générales	7
2.3	Utilisations	8
2.4	Métallurgie	8
2.5	Complexes	8
2.6	Conclusion	9
3	Éléments de métallurgie	11
3.1	Enrichissement	11
3.1.1	Comminution	11
3.1.2	Flottation par mousse ou <i>froth flotation</i>	12
3.1.3	Séchage	13
3.1.4	Frittage (<i>Sintering</i>)	13
3.2	Métallurgie par voie sèche	13
3.2.1	Réduction par fusion	13
3.2.2	Grillage ou <i>roasting</i>	14
3.3	Métallurgie par voie humide	14
3.3.1	Lixiviation ou <i>leaching</i> [4,8]	14
3.3.2	Raffinage électrolytique [8]	15
3.3.3	Électro-extraction [4,8]	15
4	Métallurgie par élément	17
4.1	Le Fer	17
4.1.1	Métallurgie	17
4.1.2	Utilisations	18
4.1.3	Particularités de l'élément	19
4.1.4	Vidéos	19

4.2	Le Cuivre	19
4.3	L'Aluminium	20
Bibliographie		21

Chapitre 1

Les 10 lois de la monographie

1.1 Lors du montage, sur les expériences tu te focaliseras.

Inutile de passer du temps sur la culture générale si vous ne maîtrisez pas les manipulations. La culture générale est un bonus qui ne remplacera pas une bonne maîtrise de la partie manipulatoire.

*Il faut penser manipulation, manipulation, manipulation ! La culture générale est **secondaire**.*

1.2 Au cours de l'année, tes monographies tu travailleras.

Une monographie fait appel à énormément de culture générale, il est donc impossible de tout lire le jour-J. Par exemple, la section sur les halogènes dans le Greenwood fait 100 pages, il est complètement illusoire de croire que vous pourrez tout relire pendant les quatre heures en plus de faire vos manipulations.

1.3 Les degrés d'oxydation de l'élément tu apprendras.

Vous devez connaître les degrés d'oxydation de l'élément que vous présentez, aussi bien les courants que ceux qui le sont moins. (Même s'il y en a qui peuvent être un peu exotique et que vous pouvez ne pas connaître.)

1.4 Le diagramme potentiel-pH de l'élément tu montreras – et utiliseras.

Le plus souvent, vous allez faire au moins une manipulation qui y fera appel, donc autant le maîtriser. N'hésitez pas à passer un peu de blanc sur la photocopie du Pourbaix pour que le diagramme affiché soit le plus lisible et simple possible. (Si possible, prenez un diagramme qui soit plus simple que celui donné dans le Pourbaix.)

Il est aussi parfois possible de présenter les diagrammes de Frost qui sont un bon complément. (Disponibles dans le Martinand-Lurin/Grüber, le Greenwood.) Vous pouvez aussi utiliser les diagrammes de Latimer (Shriver).

1.5 Les potentiels rédox des couples utilisés tu connaîtras.

Il y a souvent de l'électrochimie dans les monographies, il faut donc connaître les potentiels rédox associés, en général ils sont donnés dans les énoncés, sinon, il y a le Bernard et Busnot.

1.6 Les sources principales de l'élément tu apprendras.

Les minéraux dont sont extraits les éléments doivent être connus – bauxite, latérite, chalcoppyrite, chalcocite, pyrolusite, etc. Vous les trouverez dans la bibliographie de l'élément.

1.7 Les alliages de l'élément tu maîtriseras.

Vous devez connaître les alliages les plus courants de l'élément. Bronze (cuivre et étain), laiton (cuivre et zinc), fonte (fer carbone), cupronickel, maillechort (cuivre, nickel, zinc), monel, invar (fer, nickel), etc.

1.8 Les données industrielles tu chercheras.

Les données industrielles mises à jour sont disponibles sur le site de Mr Vigne : <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm> Les données sont actualisées régulièrement. Cela permet de connaître les pays gros producteurs – USA, chine et Russie sont de bonnes réponses par défaut.

1.9 Les différents degrés d'oxydation tu montreras.

Pour les métaux, en général, vous avez une expérience qui correspond à la production de l'élément au degré zéro. Vu l'importance pour l'industrie, il faut si possible le mettre. Il faut aussi présenter des manipulations avec les degrés d'oxydation les plus courants. C'est en général ce qui fera plus ou moins la trame du plan

1.10 La bibliographie tu consulteras.

- Le Emsley [5] réunit beaucoup de données factuelles sur deux pages, le tout classé par ordre alphabétique. Très utile pour aller rapidement à l'essentiel.
- Le Housecroft [7] est en général le meilleur endroit pour commencer, en plus il est en français.
- Les BUP – en français – sont spécifiques, mais ils peuvent être un peu dépassés pour certaines données.
- Le livre Martinand-Lurin/Grüber donne de bonnes informations supplémentaires.
- Le Greenwood [6] est plus complet, mais il est souvent TROP complet, et en anglais.
- Pour le cobalt et le cuivre, les livres de Davenport [4, 8] – en anglais – sont des références absolues pour la métallurgie.

Chapitre 2

Un exemple : le cobalt

2.1 Manipulations, plan

On commence par le choix des manipulations. **Attention, ce choix est arbitraire et subjectif !** On peut mettre de la catalyse, une pile, de la voltampérométrie cyclique, de la polarographie et ce que vous voulez d'autre.

Je choisis comme plan :

1. Métallurgie du cobalt
 - (a) Séparation du cobalt des autres éléments (la résine échangeuse d'ions)
 - (b) Obtention du cobalt métallique (électrodéposition du cobalt)
2. Quelques propriétés du cobalt au degré (II) (synthèse des complexes de cobalt et leur caractérisation.)
 - (a) Propriétés optiques
 - (b) Propriétés magnétiques
 - (c) Propriétés catalytiques (sel de seignette)

2.2 Propriétés générales

Ici, je commence par le livre *The elements* de John Emsley [5]. Qui donne l'abondance, quelques propriétés générales.

Propriété	Valeur
Nom et origine	<i>Kobald</i> Gobelins [5]
Découverte	G. Brandt (suède) 1735 [5]
Isotopes principaux	^{59}Co (100%) [5]
Minéraux principaux	smaltite (CoAs_2), Cobaltite (CoAsS), linnaeite (Co_3S_4) [5]
Abondance terrestre	20 ppm [5] 29 ppm [6]
Abondance, position	30 ^e au total [6]
Degré d'oxydation	-I à V avec les degrés 0 II et III qui sont représentatifs [5]
Potentiels standards	$E^\circ (\text{Co}^{2+} / \text{Co}) = -0,277 \text{ V}$, $E^\circ (\text{Co}^{3+} / \text{Co}^{2+}) = -1,92 \text{ V}$ [5]

Tableau 2.1

Dans le livre *The elements*, il manque des données sur l'abondance relative, il faut chercher dans les livres suivants de la bibliographie : il n'y a pas grand chose dans le Housecroft, du coup, on regarde dans le Greenwood, sur la deuxième page "Terrestrial Abundance and Distribution".

2.3 Utilisations

Pour les utilisations, il est possible de lire le site de la scf : <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/metaux/co/cadco.htm> ou dans le Crundwell chapitre 28 [4]. Les batteries viennent en tête, suivi des super alliages, les alliages pour les outils de coupe (tungstène enrichi en cobalt), les pigments [7, p 726], la catalyse et les aimants.

On a donc une trame pour présenter chacune des manipulations du II : la (a) est en lien avec les pigments, la (b) en lien avec les aimants, la (c) avec la catalyse.

2.4 Métallurgie

Aussi bien le Crundwell que Vignes indiquent que le cobalt est un « sous-produit » de l'industrie minière du nickel et du cuivre. D'où l'importance de la séparation.

Le chapitre 25 du Crundwell est très intéressant pour la première expérience (I) a)). En effet, les solutions de nickel contiennent toujours un peu de cobalt et il faut les séparer avant l'étape d'électrowinning (ou électro-extraction qui correspond à une électrolyse) car les potentiels standards sont très proches. ($E^\circ (\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) = -0.257 \text{ V}$, $E^\circ (\text{Co}^{2+}/\text{Co}) = -0,277 \text{ V}$) Le principe industriel est expliqué : extraction à contre courant avec déplacement de l'équilibre en fonction de la concentration en contre-ion (chlorure, sulfate). Dans notre cas, la séparation est effectuée avec de la chromatographie, mais il est possible de faire le parallèle vu l'importance industrielle du processus de séparation.

Les chapitre 28, 29 sont très intéressants pour la deuxième expérience. En effet, on y décrit les conditions pour l'utilisation, (différentes selon si on part d'un minerai nickelifère ou cuivrifère). Mais dans tous les cas, on finit par une étape de raffinage électrolytique après avoir éliminé un maximum d'impureté (fer, nickel, cuivre, platinoïdes) De très nombreuses données industrielles sont données ainsi que la répartition des origines (50% minerais « nickel », 50 % minerais de « cuivre »).

2.5 Complexes

Pour les propriétés optiques, il faut faire le lien avec l'utilisation en tant que pigment. Le greenwood page 1126 et suivantes insiste sur l'importance des complexes de cobalt (structure octaédrique montrée par Werner [7, p 724], transfert des mécanismes par sphère interne (Taube et Marcus PN 1983 et 1992 respectivement). Le greenwood donne même des valeurs de champ cristallin et paramètre de Racah pour différents complexes. Il est aussi intéressant de parler des complexes hygrométriques ou des colorants pour les faïences.

Lors de l'étude des propriétés magnétiques, il est possible de faire référence aux aimants AlNiCo qui peuvent former des aimants permanents très puissants. De même rappeler que le cobalt est un des rares métaux purs à être ferromagnétique (avec le fer et le nickel).

L'expérience du sel de Seignette peut permettre de parler des applications catalytiques pour le procédé Fischer-Tropsch et peut servir de première ouverture/conclusion.

Il faut aussi penser à parler des complexes de cobalt (III) qui sont cinétiquement inertes alors que les ligands des complexes de cobalt (II) sont généralement très labiles.

2.6 Conclusion

Pour la conclusion, on peut parler de la vitamine B12 ou cobalamine, indispensable à la production de globules rouges et qui fait intervenir le degré d'oxydation (I), des super-alliages pour résister aux hautes températures, etc.

Chapitre 3

Éléments de métallurgie

Le passage du minerai au métal natif ou raffiné est en général un processus long impliquant de nombreuses opérations physico-chimiques. Il est en effet courant de partir de minéraux dont la teneur en élément ne dépasse pas les quelques pour-cents avant d'arriver à la production de plusieurs tonnes de matériau fini.

Malgré la grande diversité des processus, quelques grandes étapes restent communes. En général, un enrichissement du minerai est nécessaire avant toute autre opération. Celui-ci est assuré via différents moyens physico-chimiques. Ensuite, il y a en général deux grands types de processus :

- les processus à haute température en voie sèche ;
- les processus hydrométallurgiques.

La première voie est plutôt utilisée pour les gros tonnages tandis que la deuxième est plutôt utilisée pour avoir un matériau final de haute pureté.

3.1 Enrichissement

Quel que soit la matière première, on a en général un mélange de minéraux. Tous les minéraux ne contenant pas l'élément à extraire forment la gangue. Le but de l'enrichissement est de diminuer la proportion de la gangue pour n'avoir à traiter qu'un volume réduit de matériau. De plus, moins il y a de gangue, plus le nombre d'impureté à traiter sera faible. Cette étape est cruciale pour la viabilité économique du processus dans son ensemble.

3.1.1 Comminution

La comminution correspond au concassage ou au broyage de la roche extraite. Le concassage (*crushing*) se fait en frappant le matériau contre une surface (marteau sur une enclume) alors que le concassage (*grinding*) se fait plutôt par abrasion entre des pièces en mouvement.

Le concassage est fait via divers moyens : entre des mâchoires, dans des cônes, entre des cylindres à mâchoires, dans des moulins en rotation, etc. Cela permet de passer de rochers ayant une dimension caractéristique de l'ordre du mètre à des particules qui font de l'ordre du millimètre. Le concassage se fait à des vitesses de l'ordre du millier de tonne par heure.

Le broyage se fait dans des moulins. C'est la rotation du moulin sur lui même qui va engendrer l'abrasion nécessaire pour la réduction de la taille des particules. On ajoute

parfois des agents abrasifs externes pour augmenter le broyage. Une fois le broyage effectué, le tri entre gangue et minéral d'intérêt est effectué dans des cyclones. Le tri est ensuite poursuivi par voie sèche ou humide afin d'avoir des particules calibrées en taille. La séparation s'appuie soit sur une vitesse limite de chute différente en fonction des particules (classificateur hydraulique), soit sur une séparation via des forces centrifuges (cyclone) ou encore des méthodes utilisant la densité (écoulement dans des spirales, *jig concentrator*, etc).

3.1.2 Flottation par mousse ou *froth flotation*

Une fois que les particules sont calibrées et ont déjà subi un premier tri, la séparation est poursuivie avec le procédé de flottation par mousse. L'idée est de la surface du minéral d'intérêt hydrophobe. Ensuite, en faisant buller de l'air, les particules d'intérêt vont s'attacher aux bulles pour finir dans une mousse qui surnage au dessus du reste et que l'on peut séparer.

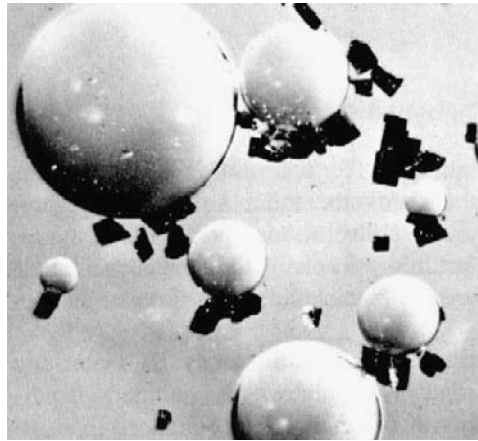


Figure 3.1 – Des particules entraînées par des bulles d'air au cours de l'étape de flottation par mousse.

Collecteurs

Les collecteurs sont des tensio-actifs qui s'attachent au minéral d'intérêt pour le rendre hydrophobe et faciliter son entraînement par les bulles d'air. En général, les surfaces sont souvent polaires, la surface hydrophile est donc rendue hydrophobe.

Agents moussants

Ils sont ajoutés pour avoir une mousse suffisamment stable afin que les particules entraînées restent en surface et facilement séparables. La mousse doit être stable mais pas trop pour pouvoir être traitée pour les étapes suivantes.

Les régulateurs

Ces agents servent à augmenter, diminuer ou contrôler le pouvoir d'entraînement des collecteurs.

3.1.3 Séchage

En général, soit le minéral contient déjà de l'eau, soit une des étapes se fait en présence d'eau. Pour les traitements par voie sèche, il est nécessaire d'éliminer un maximum d'eau avant d'effectuer une étape à haute température. Cela peut être fait dans un four tournant, par pressage, centrifugation.

3.1.4 Frittage (*Sintering*)

Le principe du frittage est de chauffer une poudre sans atteindre son point de fusion pour qu'elle se solidifie.

3.2 Métallurgie par voie sèche

3.2.1 Réduction par fusion

L'agent réducteur le plus utilisé est le charbon – sous forme de monoxyde de carbone pour une meilleure cinétique. Le réacteur à contre-courant est le plus utilisé – la source de chaleur est situé en sortie du four et le monoxyde de carbone remonte.

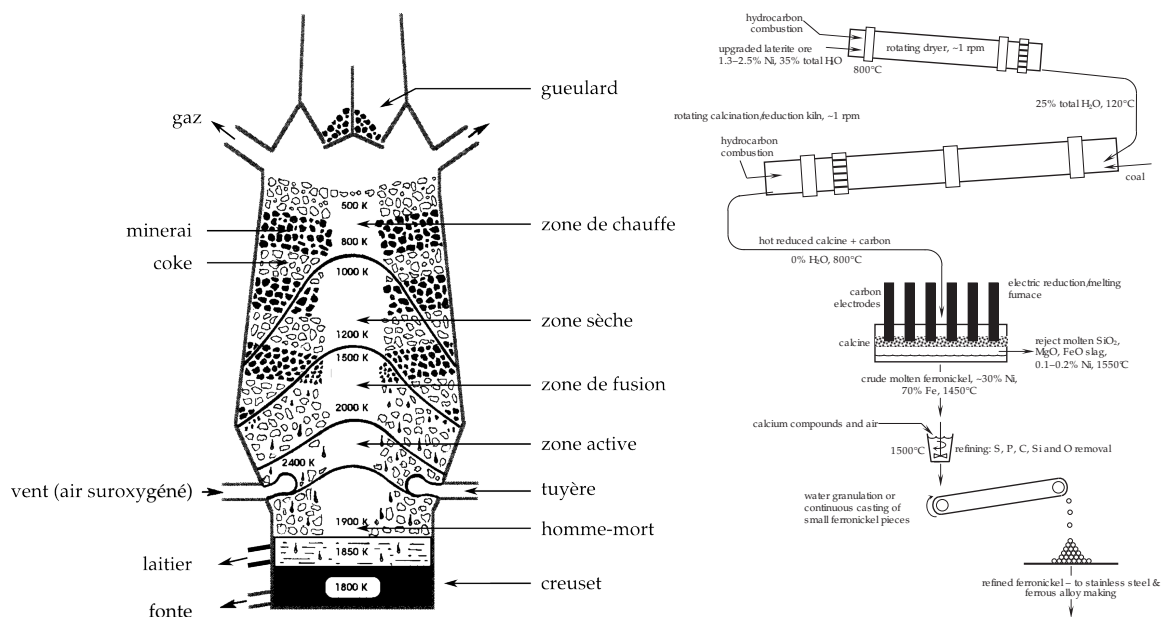


Figure 3.2 – Un haut fourneau à gauche, une partie du processus de raffinage du ferro-nickel à droite.

Dans le cas du fer, la réduction de l'oxyde au métal a lieu en une étape, pour le ferro-nickel, cela a lieu en deux étapes. Dans tous les cas, on obtient en sortie deux phases :

- un laitier qui contient essentiellement de la silice fondue, de l'oxyde de magnésium et de l'oxyde de calcium ;
- une phase riche en métal souhaité, ou un alliage fondu.

Le laitier joue un rôle crucial car il permet de contrôler finement les impuretés dissoutes dans la phase riche en métal. Par exemple, pour la production de fer, il est courant de rajouter de la gangue (dolomite, chaux) pour que le métal soit plus pur en sortie malgré le coût que cela représente d'avoir à l'ajouter, la chauffer, puis la retraiter. Les impuretés les plus gênantes sont généralement le carbone, le phosphore et le soufre.

Dans le cas du nickel, la réduction se fait en deux étapes, une première pour finir de sécher, commencer la réduction et préchauffer. Puis la réduction finale a lieu dans un four à arc électrique.

Le four à arc électrique [4] Dans un four à arc électrique, la source d'énergie est le chauffage par effet joule lors du passage du courant. Les électrodes sont en carbone et les courant utilisés peuvent atteindre les $10000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ pour un voltage de l'ordre d'un millier de Volts. Un four marche sans discontinuer pendant une quinzaine d'années.

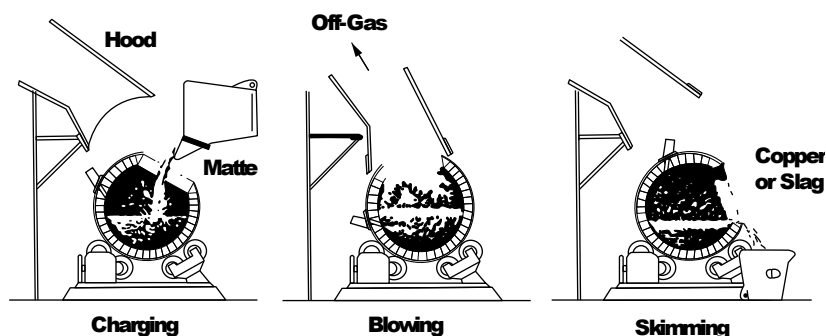


Figure 3.3 – Un convertisseur Peirce-Smith.

Le convertisseur Peirce-Smith [8] Pour les sulfures, on utilise couramment un convertisseur de Peirce-Smith. L'agent réducteur est cette fois le soufre qui est oxydé en dioxyde de soufre. Le dioxyde de soufre ainsi produit est collecté puis transformé en acide sulfurique via le procédé de contact. (Cela représente 30 % de la fabrication mondiale d'acide sulfurique – 230 millions de tonnes/an) Le laitier et la matte fondue sont coulés. L'opération est donc en semi-continu.

3.2.2 Grillage ou *roasting*

Le carbone peut être enlevé par oxydation pour former du dioxyde de carbone lors d'une étape de grillage. Le soufre restant peut aussi être enlevé : le soufre est oxydé en dioxyde de soufre en présence de dioxygène. Comme le métal peut lui aussi être oxydé, il peut être nécessaire de le re-réduire en présence de dihydrogène.

3.3 Métallurgie par voie humide

3.3.1 Lixiviation ou *leaching* [4, 8]

Le principe de la lixiviation est simple : dissoudre les minéraux avec une solution acide. Le contrôle du pH est essentiel, principalement pour faire précipiter un maximum du fer contenu dans le minerai. La lixiviation peut se faire en tas (*heap leaching*) : l'acide percole dans un tas de minerai ou elle peut se faire à chaud pour améliorer la cinétique et diminuer la solubilité des hydroxyde de fer.

La lixiviation en tas est très utilisée pour le cuivre à des échelles énormes (tas de plusieurs dizaines de mètres de haut, percolation durant plusieurs mois)

3.3.2 Raffinage électrolytique [8]

Le raffinage électrolytique correspond au procédé à anode soluble : c'est une électrolyse avec le même couple électrochimique utilisé simultanément en oxydation et en réduction. On part donc du métal solide avec impureté (en général à l'anode) :



que l'on forme purifié à la cathode.



3.3.3 Électro-extraction [4, 8]

C'est aussi une électrolyse, le métal est encore obtenu par réduction à la cathode,



mais à l'anode, ce n'est pas le même couple électrochimique qui est mis en jeu. En général, on forme du dichlore en partant des chlorures et du dioxygène avec les sulfates.

Chapitre 4

Métallurgie par élément

Plutôt que de long discours, je préfère donner des liens vers des vidéos qui sont souvent plus explicatives (mais souvent en anglais).

4.1 Le Fer

Propriété	Valeur
Nom et origine	ferrum [5]
Découverte	[5]
Isotopes principaux	[5]
Minéraux principaux	Hématite Fe_2O_3 , Magnétite Fe_3O_4 , Limonite FeOOH , Sidérite FeCO_3 , Pyrite FeS_2 [5]
Abondance terrestre	[5] [6]
Abondance, position	1 ^{er} pour les métaux de transition, 4 ^e au total [6]
Degré d'oxydation	−II + VI avec les degrés 0, II et III qui sont représentatifs [5]
Potentiels standards	$E^\circ (\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}) = -0,257 \text{ V}$ $E^\circ (\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}) = -0,257 \text{ V}$ [5]

Tableau 4.1

4.1.1 Métallurgie

C'est un des seuls métal pour lesquels on trouve des minéraux à très forte teneur (supérieur à 30 %, voire jusqu'à 60%). Ce sont surtout les gisements du Brésil qui sont exploités à l'export. Sinon, parmi les autres gros producteurs, il y a le Vénézuëla, les États-Unis, le Canada, la Russie, l'Inde et la Chine.

C'est le seul métal pour lequel on utilise les haut-fourneaux. Les matériaux introduits dans le haut-fourneau sont :

- par le haut du haut-fourneau : une succession de couches minerais de fer / coke / calcaire-magnésie ;
- par le bas du haut-fourneau, des tuyères injectent le « vent » constitué essentiellement d'air, éventuellement enrichi en oxygène ou avec des hydrocarbures.

Les matériaux récupérés en sortie sont :

- dans le creuset : de la fonte liquide (fer avec des impuretés, essentiellement du carbone), et du laitier (mélange liquide de silice et d'oxydes) ;

- par le haut du haut-fourneau : du gaz essentiellement composé de mono- et dioxyde de carbone ainsi que de l'azote.

Le rôle du mélange calcaire/magnésie est de rendre fusible la silice, l'alumine et les autres impuretés pour qu'elles finissent dans le laitier. De plus, cela permet de contrôler la teneur en soufre de la fonte. Le laitier est ensuite utilisé en tant qu'isolant acoustique ou comme remblais pour les routes. L'augmentation de la productivité des haut-fourneaux est due à une meilleure préparation des oxydes ainsi qu'à une amélioration de la qualité du coke dont le prix est un élément essentiel pour le rendement du haut-fourneau.

Après l'obtention de la fonte, les traitements consécutifs sont nombreux et souvent relativement complexes. En effet, il y a encore des étapes pour raffiner la fonte (en particulier pour enlever le soufre qui provient majoritairement du coke, le phosphore et le carbone). Le soufre diminue considérablement les propriétés mécaniques de l'acier, on effectue donc un premier traitement désulfurant en sortie du haut-fourneau – en général à base de calcium (CaO , CaC_2) de magnésium (Mg) ou de sodium Na_2O .

On introduit ensuite des éléments pour former l'alliage (chrome, manganèse, molybdène, nickel, vanadium). En plus de contrôler la composition, il faut également contrôler finement la micro-structure de l'acier car les propriétés mécaniques en sont fortement fonction. Parmi les différentes micro-structures observables, on a essentiellement :

- L'austénite qui se comporte comme une solution solide où les atomes de carbone occupent les sites octaédriques d'une maille de fer- γ (CFC)
 - La martensite qui est une phase métastable résultant du refroidissement de l'austénite ou la maille subit une dilatation dans une direction et une contraction dans les deux autres directions.
 - La cémentite Fe_3C qui est un composé défini très cassant
 - La Pearlite qui est un eutectoïde de ferrite et de cémentite qui a une dureté élevée.
- Le pentacarbonyl de fer permet d'avoir du fer de très haute pureté.

4.1.2 Utilisations

L'acier avec toutes les possibilités associées correspond à l'utilisation majoritaire du fer. On peut également faire des pigments

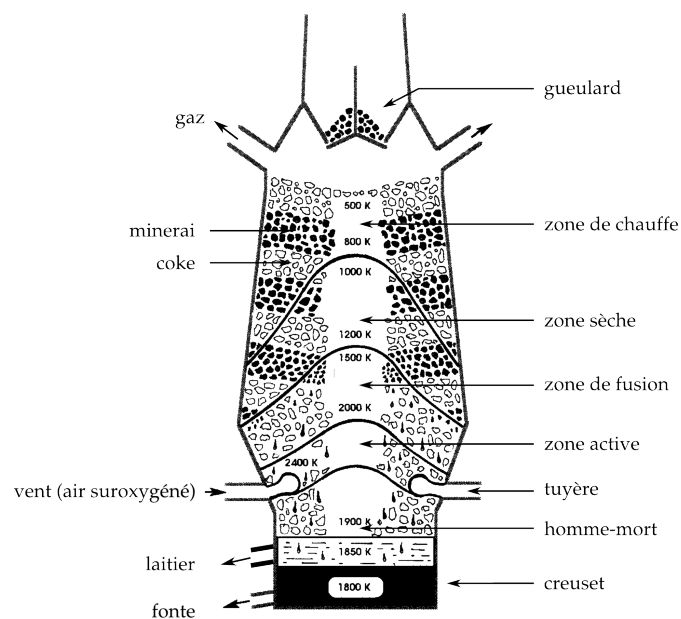


Figure 4.1 – Schéma d'un haut-fourneau.

4.1.3 Particularités de l'élément

C'est l'élément avec un grand F de la corrosion. Tous les éléments ferreux subissent sous une forme ou une autre la corrosion. Du coup, certains monuments ayant particulièrement résisté à la corrosion font figure d'exception. Le plus connu est la tour de Delhi qui date d'environ 250 à 550 ans après J.C. qui est toujours « intacte » malgré la pollution et les moussons locales.



Figure 4.2 – La tour de Delhi. Elle fait environ 6 tonnes. C'est probablement une couche en surface à haute teneur en phosphore qui permet de passiver efficacement l'acier.

C'est un des rares éléments pour lesquels la spectroscopie Mössbauer fonctionne. C'est une spectroscopie à haute énergie (rayons gamma et excitation des niveaux nucléaires) qui permet de caractériser l'environnement du fer, son degré d'oxydation ainsi que certaines propriétés magnétiques. Cette méthode est très utilisée en biologie pour les protéines avec du fer et pour l'étude des oxydes de fer.

4.1.4 Vidéos

- Steelmaking (10 min)
https://www.youtube.com/watch?v=Ea_7Rnd8BTM [2]
- STEEL : From Start to Finish (7 min)
<https://www.youtube.com/watch?v=9l7JqonyoKA> [1]
- Making Steel (47 min)
<https://www.youtube.com/watch?v=9AMbKpeJRoU> [3]

Pour ceux qui veulent en savoir un peu plus, ils peuvent regarder le sujet d'agreg blanche que j'avais fait en 2013 : <http://agregationchimie.free.fr/cours.php#examens> Surtout les parties A et B sur le haut-fourneau et les parties I, J, K sur les micro-structures des aciers.

4.2 Le Cuivre

Pour le cuivre, il existe également un livre écrit par Schlesinger [8] qui détaille la métallurgie sur environ 500 pages. Il existe aussi une [vidéo explicative](#) (en anglais).

Il faut surtout en retenir qu'il y a deux sources principale : les oxydes et les sulfures. Dans les deux cas, la dernière étape du raffinage est une étape électrochimique (procédé à anode soluble ou raffinage électrolytique).

4.3 L'Aluminium

Il y a également [une vidéo en anglais](#) très bien faite. On part de la bauxite puis on fait une réduction par électrolyse.

Bibliographie

- [1] STEEL : From Start to Finish, August 2009.
- [2] Steelmaking, December 2009.
- [3] Making Steel, December 2012.
- [4] Frank Crundwell, Michael S. Moats, and Venkoba Ramachandran. *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals*. Amsterdam, Pays-Bas, Etats-Unis, 2011.
- [5] John Emsley. *The elements*. Clarendon Press, Oxford, Royaume-Uni, 1998.
- [6] Norman Neill Greenwood and Alan Earnshaw. *Chemistry of the elements*. Oxford, Royaume-Uni, Etats-Unis, 1997.
- [7] Catherine E. Housecroft and Alan George Sharpe. *Chimie inorganique*. De Boeck, DL 2010, Bruxelles, Belgique, 2010.
- [8] Mark E. Schlesinger. *Extractive metallurgy of copper*. Amsterdam, Pays-Bas, 2011.